



Predicción de fallo en laminados no convencionales: Estudio experimental

M.L. Velasco, J.C. Marín, J. Justo, F. París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela de Ingenieros Universidad de Sevilla, España. marialuisavelasco1989@gmail.com

RESUMEN

Desde el inicio del uso de los materiales compuestos, han ido surgiendo distintas teorías para predecir su comportamiento y lo que es más importante, el fallo del material. Mientras que las predicciones parecen fiables en fallos dominados por la fibra no son tanto en fallos dominados por la matriz. En este trabajo se analiza el comportamiento experimental de laminados en los que el fallo dominante es el fallo por la matriz y se comparan los resultados con las predicciones, tanto en fallo a primera como a última lámina, que generan los criterios de fallo más utilizados. En todos los casos se ha incluido el estudio del efecto del espesor de las láminas, conocido como efecto escala, para ver su incidencia en la rotura de los laminados y en las correspondientes predicciones. Se ha constatado que en laminados dominados por el fallo de la matriz, las predicciones no son buenas, existiendo además una significativa incidencia del efecto escala, con una clara interacción entre láminas. Ambos problemas se mitigan cuando se usa un laminado cuyo fallo está dominado por la rotura de la fibra.

PALABRAS CLAVE: Materiales Compuestos, Criterios de fallo, Efecto Escala

1. INTRODUCCIÓN

La dificultad para predecir el fallo de laminados de material compuesto es elevada y no siempre los criterios de fallo más comúnmente aplicados conducen a predicciones similares, *París et al* [1]. Un estudio comparativo sobre criterios de fallo en materiales compuestos, *París* [2], alertaba sobre la importancia de que la mayoría de los criterios no estén físicamente basados y las implicaciones que ello podía tener en predicciones erróneas. Muchas de ellas han sido explicadas en trabajos posteriores, ver por ejemplo *París et al* [3], para dilucidar el papel de la tensión paralela al plano de fallo, típicamente no considerada en la mayoría de los criterios. La comunidad científica ha manifestado la importancia de esta cuestión en el uso de los materiales compuestos en un ejercicio de predicción de fallo, ver por ejemplo, *Soden et al* [4]. Mientras que las predicciones asociadas al fallo de la fibra presentan menos dispersión, en relación al uso de diferentes criterios no sucede lo mismo con el fallo de la matriz (también llamado entre fibras) donde las predicciones pueden ser muy dispares. En laminados dominados por las fibras a 0 grados (alineadas con la carga), las predicciones entre diferentes criterios, de acuerdo a lo mencionado, se uniformizan bastante y además están bastante de acuerdo con los resultados experimentales. Sin embargo en laminados no dominados



por las láminas a 0 grados, el fallo dominante es el fallo de la matriz, pudiéndose producir además una interacción muy significativa entre láminas, interacción que puede verse condicionada por las relaciones de espesor entre las mismas, lo que se ha conocido tradicionalmente con “efecto escala” o denominado como “in situ properties”, *Flaggs et al* [5]. Podría pensarse que lo importante es la predicción del fallo en la dirección dominada por la fibra, pues debería corresponder a la mayor sollicitación. Sin embargo, un determinado laminado estará sometido a todo tipo de cargas y alguna no asociada a la dirección más reforzada puede tener un efecto devastador. El objetivo de este trabajo es investigar el comportamiento de laminados en la situación mencionada, lo que se ha denominado como laminados no convencionales, intentando explorar sobre ellos el efecto de la distribución de las láminas anteriormente mencionado.

2. DEFINICIÓN DE LAMINADOS Y ENSAYOS

Se han fabricado y ensayado a tracción 3 laminados de los que hemos llamado “no convencionales” (dominados por rotura de la matriz) y uno de tipo estándar (ya que éste incluye láminas con orientación 0°) con factor de repetitividad de cada lámina: $n=1$ y $n=3$, Tabla 1. Se ha usado material AS4/8552, siendo necesaria la colocación de tacones de fibra de vidrio en los extremos.

Tabla 1. Laminados ensayados

LAMINADO N°	SECUENCIA DE APILADO
1	[45, -15] _S
2	[45 ₃ , -15 ₃] _S
3	[90, 45, -45] _S
4	[90 ₃ , 45 ₃ , -45 ₃] _S
5	[0, 90, 45] _S
6	[0 ₃ , 90 ₃ , 45 ₃] _S
7	[45, -15, 15, -45] _S
8	[45 ₃ , -15 ₃ , 15 ₃ , -45 ₃] _S

Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos de los ensayos: valores medios obtenidos a partir de los 5 especímenes ensayados de cada laminado

LAMINADO N°	$E_x \pm \sigma$ (GPa)	$\sigma_R \pm \sigma$ (MPa)	$\epsilon_R \pm \sigma$ (%)
1	60,7 \pm 3,59	663,4 \pm 32,21	1,37 \pm 0,041
2	50,5 \pm 4,38	411,5 \pm 10,58	0,90 \pm 0,087
3	22,6 \pm 1,67	226,9 \pm 3,59	1,22 \pm 0,083
4	20,8 \pm 0,29	113,9 \pm 4,86	0,56 \pm 0,043
5	54,2 \pm 2,27	685,8 \pm 43,13	1,27 \pm 0,095
6	51,2 \pm 2,50	604,0 \pm 8,20	1,26 \pm 0,087
7	63,6 \pm 2,40	766,8 \pm 21,02	1,25 \pm 0,024
8	64,6 \pm 0,86	523,6 \pm 14,54	0,82

La Figura 1 muestra las diferentes roturas que se han producido en los especímenes ensayados, donde puede observar que en los laminados con $n=1$ se produce la rotura de



fibras en determinadas láminas mientras que con $n=3$ sólo tiene lugar el fallo de la matriz en todas las láminas. En la Tabla 2 aparecen los resultados de parámetros experimentales, módulo de Young (E_x), tensión (σ_R) y deformación de rotura (ϵ_R), valores medios con sus respectivas desviaciones típicas. En ellos puede apreciarse que en laminados con $n=1$ la rotura tiene lugar a una carga y deformación mayor que con $n=3$. Esto puede deberse a que en los laminados con $n=1$, todas láminas adyacentes a una cualquiera tienen una orientación distinta y se produce una mayor interacción entre ellas, inhibiéndose (retrasándose) la aparición del fallo. Esto ocurre en todos los laminados menos en el caso de los laminados nº5 y nº6, donde la diferencia es menos significativa. Esto es debido a que dichos laminados incluyen (son los únicos) láminas con orientación 0° , que son las que controlan el fallo del laminado en cuestión.



Fig. 1. Probetas ensayadas de los laminados nº1, nº2, nº3, nº4, nº7 y nº8

3. CRITERIOS DE FALLO Y PREDICCIONES

Los criterios usados corresponden a los más populares, *París et al [1]*: Máxima tensión (MT), Máxima deformación (MD), Tsai-Hill (T-H), Tsai-Wu (T-W), Hashin-Rotem (H-R), Hashin (H), Puck (P). Para predecir la rotura final del laminado se ha implementado un proceso de degradación, a medida que los criterios predicen el fallo de las láminas. Cuando se ha producido el fallo de una lámina, se ha procedido a degradar las propiedades de ésta, con un factor $D=0,5$, cuando el fallo tenía lugar en la matriz, y con $D=0,1$, cuando falla la fibra. Se ha permitido durante este estudio hasta tres fallos de la matriz de cada lámina y solamente uno para el caso del fallo de la fibra. La Figura 2 muestra representaciones gráficas de las predicciones de tensión y deformación de fallo, al aplicar el criterio de Puck, para cada una de las secuencias de apilado y sus respectivas cargas de fallo experimentales. En ella se puede observar que las predicciones de dicho criterio se ajustan mejor al fallo experimental en el caso de los laminados nº5 y nº6, ya que en el resto se sitúan por encima de éstos. Las predicciones se ajustan siempre mejor a la carga de fallo experimental de los laminados con $n=1$, ya que ésta siempre es mayor que la de $n=3$.

La detección del FPL en los gráficos experimentales es bastante complicada, en algunos casos es imperceptible, por lo que la comparación de éstos con lo que predicen los

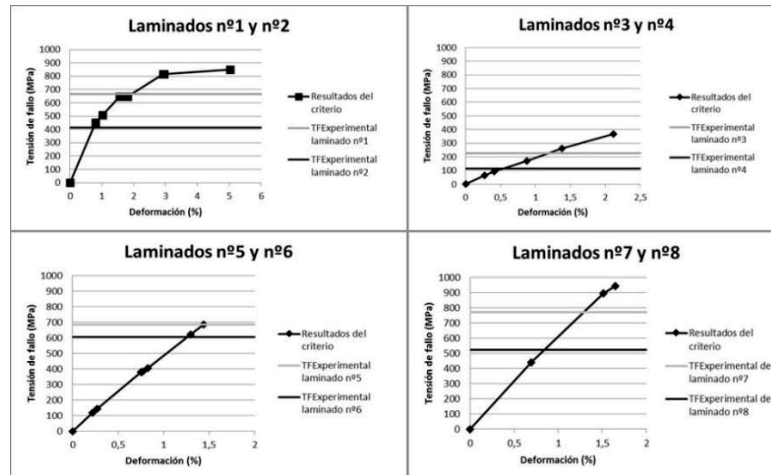


Fig. 2. Predicciones del criterio de Puck para cada uno de los laminados

Tabla 3. Resultados de las predicciones para el fallo a primera lámina de los laminados, donde las tensiones están en MPa y las deformaciones en %

LAMINADO		1	2	3	4	5	6	7	8
E	σ_{FUL}	286,5	169,8	125,6	79,5	522,6	292,4	-	-
	ϵ_{FUL}	0,24	0,16	0,24	0,18	0,48	0,26	-	-
M T	σ_{FUL}	445,0		65,3		118,7		648,1	
	ϵ_{FUL}	0,79		0,27		0,22		1,02	
M D	σ_{FUL}	445,0		60,2		109,8		648,1	
	ϵ_{FUL}	0,79		0,25		0,20		1,02	
T-H	σ_{FUL}	441,4		64,6		117,7		422,0	
	ϵ_{FUL}	0,78		0,27		0,22		0,67	
T-W	σ_{FUL}	474,4		59,1		107,8		350,3	
	ϵ_{FUL}	0,84		0,25		0,20		0,55	
H-R	σ_{FUL}	444,9		65,3		118,6		422,0	
	ϵ_{FUL}	0,79		0,27		0,22		0,67	
H(80)	σ_{FUL}	441,5		65,3		118,6		422,0	
	ϵ_{FUL}	0,79		0,27		0,22		0,67	
PUCK	σ_{FUL}	452,4		65,3		118,6		440,8	
	ϵ_{FUL}	0,80		0,27		0,22		0,70	

criterios debe entenderse solo a título indicativo. La Tabla 3 muestra las predicciones para FPL de todos los criterios para cada una de las secuencias de apilado, donde se aprecia que los resultados están todos en torno a un cierto valor, menos en el caso de los laminados nº7 y nº8, en los cuales las predicciones son más dispersas. Por otro lado, la Tabla 4 muestra las predicciones de FUL, las cuales están por encima de los resultados experimentales en el caso de los laminados nº3, 4, 7 y 8, mientras que para el caso de



Tabla 4. Resultados de las predicciones para el fallo a última lámina de los laminados, donde las tensiones están en MPa y las deformaciones en %

LAMINADO		1	2	3	4	5	6	7	8
E	σ_{FUL}	663,4	411,5	226,9	113,9	685,8	604,0	766,8	523,6
	ϵ_{FUL}	1,37	0,90	1,22	0,55	1,27	1,25	1,24	0,82
M T	σ_{FUL}	631,3		368,8		688,4		971,3	
	ϵ_{FUL}	2,26		2,14		1,44		1,64	
M D	σ_{FUL}	631,3		412,3		702,0		964,2	
	ϵ_{FUL}	2,26		2,21		1,45		1,63	
T-H	σ_{FUL}	557,7		290,0		537,2		738,2	
	ϵ_{FUL}	2,00		1,67		1,12		1,25	
T-W	σ_{FUL}	667,0		286,3		585,7		817,6	
	ϵ_{FUL}	2,43		1,54		1,22		1,38	
H-R	σ_{FUL}	607,3		368,8		688,4		971,3	
	ϵ_{FUL}	2,18		2,14		1,44		1,64	
H(80)	σ_{FUL}	597,8		368,8		660,6		748,0	
	ϵ_{FUL}	3,54		2,14		1,38		1,26	
PUCK	σ_{FUL}	674,2		365,9		685,5		944,3	
	ϵ_{FUL}	2,96		2,12		1,44		1,65	

Tabla 5. Resultados de las predicciones aplicando límites de deformación experimental de los laminados, donde las tensiones están en MPa y las deformaciones en %

LAMINADO		1	2	3	4	5	6	7	8
E	σ	663,4	411,5	227,0	113,9	685,8	604	766,8	523,6
	ϵ	1,37	0,90	1,22	0,56	1,27	1,26	1,25	0,82
M T	σ	556,5	443,5	170,6	102,4	422,3	422,3	648,1	648,1
	ϵ	1,33	0,9	0,87	0,45	0,86	0,86	1,02	1,02
M D	σ	556,5	443,5	155,2	127,8	465,7	465,7	648,1	648,1
	ϵ	1,33	0,9	0,79	0,55	0,94	0,94	1,02	1,02
T-H	σ	429,8	402,6	160,9	93,76	537,2	537,2	738,2	422
	ϵ	1,21	0,81	0,82	0,41	1,12	1,12	1,24	0,67
T-W	σ	511,2	474,4	134,5	105,8	585,7	585,7	350,3	350,3
	ϵ	1,03	0,84	0,69	0,46	1,22	1,22	0,55	0,55
H-R	σ	469,3	444,9	170,6	94,3	407,2	407,2	422	422
	ϵ	1,32	0,88	0,87	0,41	0,83	0,83	0,67	0,67
H (80)	σ	549,4	441,5	170,6	94,3	407,2	407,2	422	422
	ϵ	1,32	0,83	0,87	0,41	0,83	0,83	0,67	0,67
PUCK	σ	506	452,4	170,6	92,8	404	404	440,8	440,8
	ϵ	1,02	0,8	0,87	0,4	0,83	0,83	0,7	0,7

los 5 y 6 se ajustan de forma adecuada, al igual que con el 1. Sin embargo las predicciones superan los resultados experimentales de fallo para el laminado 2. Las



predicciones de los criterios, en algunas ocasiones proporcionan deformaciones excesivas que no aparecen experimentalmente. En la Tabla 5 se observa que los valores de las predicciones imponiendo límite experimental se ajustan más a los laminados con $n=3$ que con $n=1$, ya que estos últimos no superan los valores experimentales.

Tabla 5. Efecto escala que tiene lugar entre los laminados

Efecto Escala	$\Delta n^{\circ}1$ y $n^{\circ}2$	$\Delta n^{\circ}3$ y $n^{\circ}4$	$\Delta n^{\circ}5$ y $n^{\circ}6$	$\Delta n^{\circ}3$ y $n^{\circ}4$
σ_R	1,61	2	1,14	1,46
ϵ_R	1,52	2,21	1	1,51

Tabla 6. Ajuste de las predicciones con respecto a los resultados experimentales

Nº	Laminado	FUL	
		Sin límite de deformación	Límite de deformación de los ensayos
1 y 2	[45n°, -15n°]s	n=1	n=3
3 y 4	[90n°, 45n°, -45n°]s	n=1	n=3
5 y 6	[0n°, 90n°, 45n°]s	n=1 y n=3	n=1 y n=3
7 y 8	[45n°, -15n°, 15n°, -45n°]s	n=1	n=3

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Es remarcable la diferencia de carga y de deformación de rotura que tiene lugar entre los laminados con la misma secuencia de apilado y diferente factor de escala ($n=1$ y $n=3$). Para medir esta diferencia se define el factor Δ , como el cociente del valor de un determinado parámetro cuando $n=1$ y $n=3$, representando este valor el denominado “efecto escala”. En la Tabla 5 se aprecia que sufren un mayor efecto escala los laminados $n^{\circ}3$ y $n^{\circ}4$, que están formados por láminas débiles (45° y 90°), mientras que los laminados $n^{\circ}5$ y $n^{\circ}6$ resultan menos afectados, siendo el efecto escala inapreciable, lo que puede atribuirse a que poseen en su secuencia de apilado láminas fuertes (0°). Por otro lado, la Tabla 6 resume el hecho de que las predicciones de los criterios sin imponer ningún tipo de límite, se ajustan mejor a los resultados experimentales de los laminados con $n=1$, mientras que cuando se limitan con la deformación experimental, se ajustan a los laminados con $n=3$.

REFERENCIAS

1. PARÍS, F, CAÑAS, J, MARÍN, J.C. y BARROSO, A., (2011) Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos, Escuela Superior de Ingenieros, Sevilla.
2. PARÍS, F. (2001). A Study of Failure Criteria of Fibrous Composite Materials, NASA/CR2001-210661.
3. PARÍS, F, CORREA, E., CAÑAS, J. (2003), Micromechanical view of failure of the matrix in fibrous composite materials. Comp. Science and Technology 63, 1041–1052.
4. SODEN, P.D., KADDOUR, A.S., HINTON, M. C. (2004) Recommendations for designers and researchers resulting from the World Wide Failure Exercise, *Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composite*, pp. 1123-1151.
5. FLAGGS, D. L., KURAL, M. H. (1982) Experimental Determination of the In Situ Transverse Lamina Strength in Graphite/Epoxy Laminates, J. Com. Mat., Vol 16 p.103.